



气泡帷幕对爆破冲击波的削减效果及 鱼类安全防护研究*

卢林¹, 李文杰², 万字², 杜洪波², 杨宵¹

(1. 重庆交通大学, 水利水运工程教育部重点实验室, 重庆 400074;

2. 重庆交通大学, 国家内河航道整治工程技术研究中心, 重庆 400074)

摘要: 航道整治工程中多采用水下爆破的方式对碍航礁石予以清除, 爆破产生的冲击波会对鱼类安全存在一定的影响, 目前多采用气泡帷幕的方式削减冲击波峰值压力。研究通过构建更接近实际的气泡帷幕数值模型, 探明不同布置方式下气泡帷幕对爆破冲击波压力的削减效果及其作用下的鱼类存活最小体长。研究结果表明: 气泡帷幕对冲击波压力的削减程度在前半段(65%~69%)大于后半段(10%~12%)。随着气泡体积占比的上升, 气泡帷幕对冲击波峰值压力的削减率也随之提升, 但当气泡体积占比达到40%后, 削减率增幅减小且趋于平缓。气泡帷幕距爆源10、15、20 m下的鱼类存活最小体长分别为20~34、14~30、12~24 cm, 气泡帷幕厚度为2、3、4 m下鱼类存活的最小体长分别为12~24、10~22、6~17 cm。研究结果可为航道整治工程实施下鱼类资源的保护提供理论依据。

关键词: 气泡帷幕; 爆破冲击波; 削减作用; 鱼类安全

中图分类号: U65; O383.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-4972(2024)01-0008-07

Reduction effect of bubble curtain on blasting shock wave and fish safety protection

LU Lin¹, LI Wenjie², WAN Yu², DU Hongbo², YANG Xiao¹

(1. Key Laboratory of Water Conservancy and Water Transportation Engineering, Ministry of Education,

Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China;

2. National Inland Waterway Regulation Engineering Technology Research Center, Chongqing Jiaotong University, Chongqing 400074, China)

Abstract: In the waterway improvement projects, underwater blasting is often used to remove the reefs that obstruct navigation, and the shock waves generate by blasting would affect the safety of fish. At present, bubble curtain is commonly used to reduce the shock waves peak pressure. In this study, a numerical model of bubble curtain is constructed to investigate the reduction effect of bubble curtain on blasting shock wave pressure and the minimum length of fish survival under the effect of different arrangements. The results show that the reduction of shock wave pressure by bubble curtain is greater in the first half (65%-69%) than in the second half (10%-12%). With the increased of bubble volume proportion, the reduction rate of bubble curtain on shock wave peak pressure also increases. However, when the bubble volume proportion reaches 40%, the increase of reduction rate decreases and tends to level off. The minimum length of fish surviving under the bubble curtain 10, 15, and 20 m from explosive source are 20~34, 14~30, and 12~24 cm respectively, and the minimum length of fish surviving under the bubble curtain thickness of 2, 3 and 4 m is 12~24, 10~22 and 6~17 cm respectively. The results of the study can provide theoretical basis for the protection of fish resources under the implementation of waterway regulation projects.

Keywords: bubble curtain; blasting shock wave; reduction effect; fish safety

收稿日期: 2023-05-06

*基金项目: 重庆市自然科学基金项目(cstc2021jcyj-jqX0009, cstc2021jcyj-msxmX0952); 水利水运工程教育部重点实验室开放基金资助项目(SLK2021B10); 长江航道局科研项目(YG04-CF-QT-2021024)

作者简介: 卢林(1998—), 男, 硕士研究生, 研究方向为航道整治生态效应。

通讯作者: 万字(1986—), 男, 博士, 教授, 研究方向为生态航道。E-mail: wanyu_hhxy@cqjtu.edu.cn

目前, 在航道整治工程中, 多采用水下钻孔爆破的方式对碍航礁石予以清除, 但水下爆破冲击波会对水中生物造成一定的影响^[1]。为减小水下爆破冲击波的危害, 目前最常用的方法是在水下爆破冲击波传递过程中加设气泡帷幕^[2]。当冲击波从水体传递至气泡帷幕时, 由于不同介质波的阻抗, 发生反射、透射和绕射等现象, 其应力和能量得到一定程度的削减。因此, 研究气泡帷幕对冲击波的削减效果以及在水下爆破时对鱼类的安全防护有助于航道整治与鱼类资源保护协调发展。

目前学者针对气泡帷幕对冲击波的衰减效果展开了大量的研究^[3-5]。研究表明气泡帷幕数量和防护距离对水下冲击波的削减起主要作用, 当气泡帷幕与被保护对象距离越近时, 对冲击波峰值压力和冲量的衰减作用越明显^[6], 但气泡帷幕区域内气泡数量对冲击波的衰减效果同样不可忽略; 司剑峰等^[7]通过数值模拟发现气泡帷幕区域内气泡数量越多防护效果越好, 但当气泡达到一定数量后气泡帷幕的整体连续性及其稳定性基本固定, 其防护效果也趋于稳定。以上对于气泡帷幕的模拟多采用纯气体层分布的单一材料属性或者气-液间隔的均匀分布材料属性来模拟气-液混合层, 忽略了气泡帷幕在空间分布上的非连续性、非均匀性的特点。另外, 针对气泡帷幕形状的模拟多采用矩形区域内气泡随机投放, 忽略了气泡帷幕在空间分布上的倒锥形特点。因此针对气泡帷幕本身特性的数值模拟有待进一步加强, 需要构建更加接近实际的气泡帷幕数值模型。同时, 气泡帷幕对鱼类防护效果, 前人研究得出水下爆破有气泡帷幕防护时, 鱼类的死亡率比无气泡帷幕时低的定性结论^[8], 但对于不同气泡帷幕布置方式下鱼类的防护效果研究还相对缺乏。

因此, 研究通过构建更接近实际的气泡帷幕数值模型, 分析不同充气量下气泡帷幕对冲击波的削减效果的影响, 并结合典型鱼类安全波压模型^[9]探明不同布置方式下的气泡帷幕对鱼类安全

的防护效果, 以期为长江上游航道整治工程实施下鱼类资源的保护提供理论依据。

1 数值模型的建立

1.1 算法选择及气幕网格划分

LS-DYNA 数值模拟软件拥有多种算法, 在实际模拟运用中常见的有 3 种: Euler 算法、Lagrange 算法和 ALE 算法。本模型建立中: 炸药、水体和空气部分采用 ALE 算法; 礁石和炮泥部分采用 Lagrange 算法; 考虑气泡几何形态的气泡帷幕倒锥形模型通过 LS-DYNA 中自带的 APDL 软件实现并采用映射网格进行网格划分, 网格的长度设定为 0.5 cm。图 1 为研究所建立的气泡帷幕网格划分示意图。

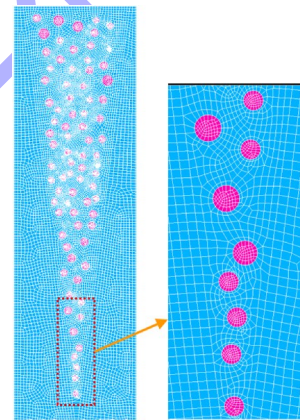


图 1 气泡帷幕网格划分

1.2 材料模型及计算原理

1.2.1 岩石的材料模型

模型中岩石采用弹塑性材料 (MAT_PLASTIC_KINEMAT_C)^[10], 其力学性能参数见表 1。

表 1 岩石的物理参数

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	弹性模量 E / GPa	泊松比 ν	抗压强度 σ_m / MPa	抗拉强度 σ_{mt} / MPa
2.3	33.7	0.27	63.64	4.16

1.2.2 水体与气幕的材料模型

水体和空气定义为空材料模型 (MAT-NULL), 同时高温高压下的气体和水体采用 Gruneisen 状态方程进行描述^[11]:

$$P = \frac{\rho_0 C^2 u \left[1 + \left(1 - \frac{\gamma_0}{2} \right) u - \frac{a}{2} u^2 \right]}{\left[1 - (S_1 - 1)u - S_2 \frac{u^2}{u+1} - S_3 \frac{u^3}{(u+1)^2} \right]^2} + (\gamma_0 + au) E_0 \quad (1)$$

式中： ρ_0 为材料初始密度； γ_0 为 Gruneisen 参数； E_0 为初始内能； C 为曲线的截距； S_1 、 S_2 、 S_3 分别为曲线的斜率参数； u 为动力黏性系数， $u = \rho/\rho_0 - 1$ ； a 为体积修正因数。水和空气材料方程参数见表 2。

表 2 水与空气状态方程参数

材料名称	$\rho_0 / (\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	C	S_1	S_2	S_3	$u/10^{-4}$	γ_0	E_0
水	1	1.647	0.344	-0.096	0	8.9	0.35	0
空气	0.001 29	0.344	0	0	0	8.9	1.40	0

1.2.3 炸药材料模型

模型使用 2# 岩石乳化炸药，采用高能炸药模型 (MAT_HIGH_EXPLOSIVE_BURN)，用 JWL 状态方程进行描述^[12]，其参数见表 3。

$$P = A \left(1 - \frac{w}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left(1 - \frac{w}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{w E_0}{V} \quad (2)$$

式中： P 为压力； E_0 为初始内能； V 为相对体积； e 为爆轰产物的比内能； A 、 B 、 R_1 、 R_2 、 w 为材料常数。

表 3 炸药状态方程参数

密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	A / GPa	B / GPa	R_1	R_2	w	$E_0 / (\text{GJ} \cdot \text{m}^{-3})$	爆压 P / GPa
1.3	216.7	0.184	4.2	0.9	0.15	4.19	18.5

1.3 模型建立

计算模型见图 2，上部空气厚度为 0.1 m，炮孔上方水域厚度为 0.7 m，右部水域厚度为 0.8 m，炮孔处岩体厚度为 0.2 m，右部底层岩体厚度为 0.1 m。模型选取直径为 10 mm 的炮孔，孔深 0.1 m，装药高度 0.06 m，依据模型尺寸，为使冲击波峰值压力在气泡帷幕削减后仍有一定数级，炸药量取 7.8 g。为模拟实际气泡的分布及大小特性，模型中采用倒锥的截面形式作为气泡帷幕区域，上侧宽 0.2 m；依据前人气幕高速摄影试验取气泡的半径为 5~20 mm。图 2 数值模型网格图中气泡帷幕区域内气泡体积占比为 60%。

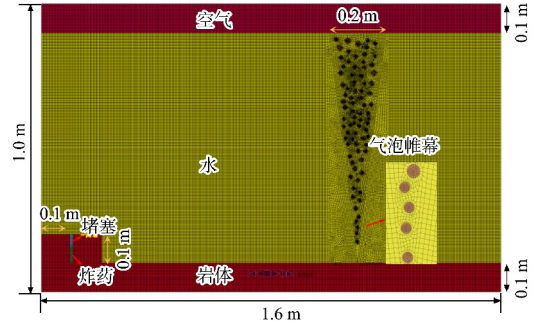


图 2 模型网格

2 气泡帷幕对冲击波的削减效果

2.1 压力云图及单元时程分析

数值模型压力云图传播过程见图 3。4.0~37.4 μs 时间内水下炸药发生爆炸后产生的冲击波波形为柱形球面波，这是因为在模拟时炸药采用条柱形填充，57.2 μs 时爆炸冲击波到达气泡帷幕左侧边缘，并与距离水底较近的气泡发生接触；57.2~66.4 μs 时间内冲击波在气泡帷幕区域发生反射、透射、绕射作用，能量一部分储存于气泡之中，一部分通过气泡之间的间隙绕射出气幕区域。从 81.7、115.3 和 125.7 μs 时刻云图可以看出，气泡帷幕区域最下侧冲击波最先透射和绕射出来并依次向上、向前传播，形成波浪形的前驱应力波，153.4 μs 时应力波基本完全穿过气幕区域并形成多个球面波的叠加。

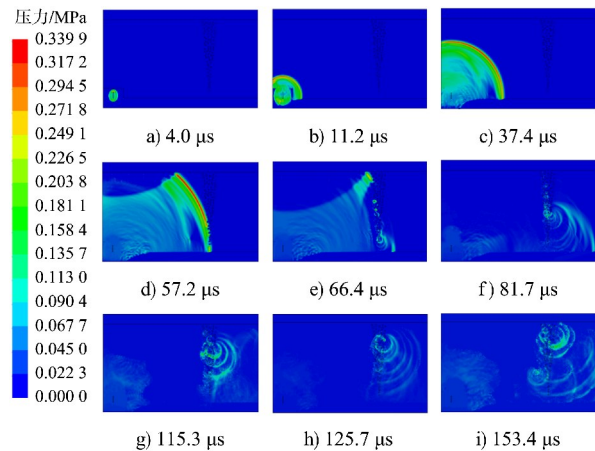


图 3 冲击波压力云图

为探明爆破冲击波压力在气泡帷幕前后随时间的变化过程，见图 4，在气泡帷幕中轴线及其左右侧 0.1 m 处按距离水底 0.2、0.4、0.6 m 的高程选取 A、B、C 3 组测点。各测点的压力时程曲线见图 5。

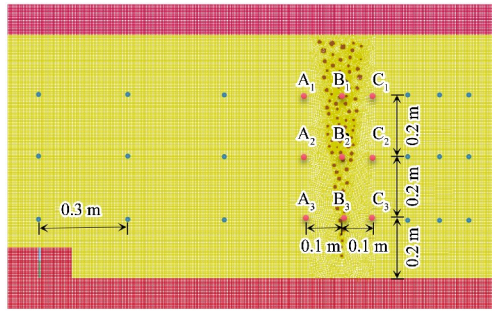
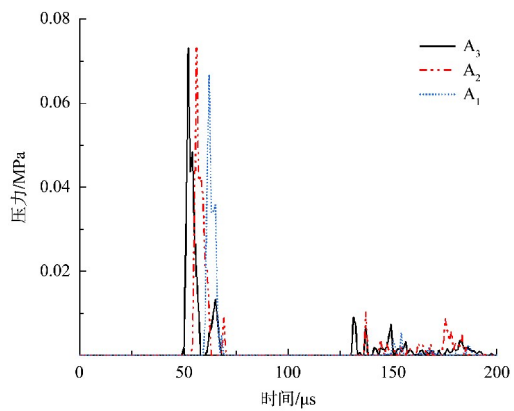
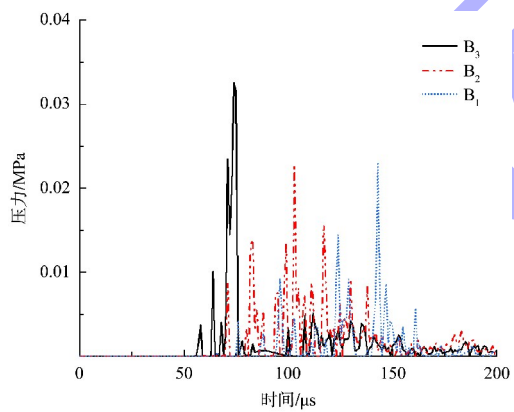


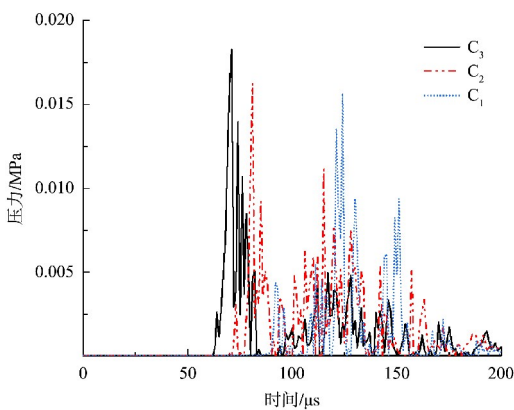
图 4 监测点位置



a) 气泡帷幕前



b) 气泡帷幕中



c) 气泡帷幕后

图 5 冲击波压力的时程曲线

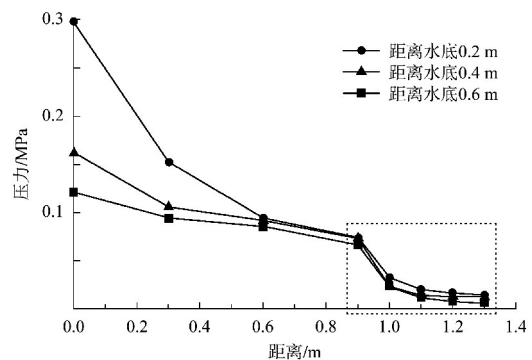
从图 5 可以看出气泡帷幕前的 A_1 、 A_2 、 A_3 监测点的应力时程曲线呈现出标准的冲击波传播特征, 有两个明显的峰值且出现的时间有一定的间隔。这是因为到达水中监测点的冲击波有两种传播途径: 一是水下爆破后冲击波经炮孔直接传播到水中形成的爆破冲击波, 峰值大、出现时间快; 二是水下爆破后产生爆轰产物所形成的膨胀应力波, 峰值小、出现时间慢。这与前人实测爆破冲击波压力的时程曲线图变化趋势一致^[13]。

从图 5B、C 处的压力时程图可以看出冲击波经过气泡帷幕削减后, 各监测点的压力时程曲线并没有呈现标准的冲击波压力传播特征, 而是出现多个峰值叠加的情况, 这与图 3 中 81.7、115.3 和 125.7 μs 时刻云图分析的结果一致, 是由于冲击波在气泡帷幕区域发生反射、透射、绕射作用, 多个球面波叠加所导致^[14]。

2.2 气泡帷幕对冲击值压力的削减效果

为具体分析有气泡帷幕时水域介质中冲击波峰值压力的空间衰减性质, 如图 4 所示, 在水深方向每 0.2 m 取 1 排, 水平方向上每隔 0.3 m 取 1 个点, 经过气泡帷幕时每隔 0.1 m 取 1 个点, 一共 27 个点。各个监测点的峰值压力见图 6。

由图 6 可见, 在 0~0.9 m 范围内, 冲击波没遇到气泡帷幕前冲击波峰值压力沿水平方向的衰减是距离水底越近衰减速度越快, 且靠近水底位置的峰值压力大于水面附近并且衰减速率逐渐下降趋于平缓。在 0.9~1.1 m 范围内, 冲击波经过气泡帷幕时其峰值压力得到较大削减。在 1.1~1.3 m 范围内, 冲击波经过气泡帷幕后其峰值压力衰减再次趋于平缓。



a) 整体

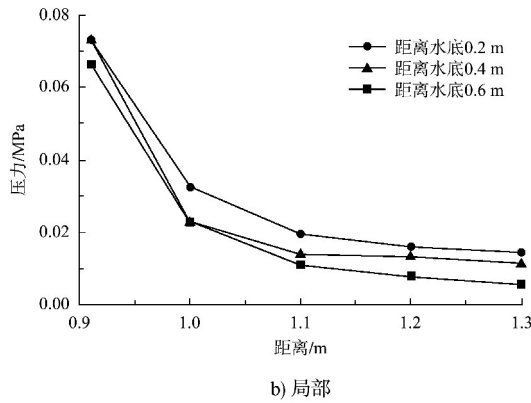


图6 冲击波峰值空间分布统计

气泡帷幕前中后 A、B、C 3 组测点的冲击波压力见表 4。结果显示，冲击波从气幕前的监测点

传播至气幕中轴线监测点时，其峰值压力的削减比例为 65%~69%；从气幕中轴线监测点传播至气幕后的监测点时，其峰值压力的削减比例为 8%~10%。比较冲击波峰值压力在水平方向的削减，气幕前半段的削减效果远大于后半段。这是由于在相同传播距离下爆破冲击波压力衰减速率与其压力成正相关性，因此在模拟中冲击波压力经气幕前半段的削减骤降后，在后半段的削减速率远小于前半段。比较冲击波峰值压力垂直方向上的削减，距离水底最远的监测点削减效果最好，由气泡帷幕前的 0.066 6 MPa 降低至泡帷幕后的 0.016 0 MPa，削减率达 77%。

表 4 监测点爆破冲击波峰值压力

测点距水底 距离/m	气幕前峰值 压力/MPa	气幕后峰值 压力/MPa	总体削减 比率/%	气幕中峰值 压力/MPa	气幕前半段(A-B) 削减比率/%	气幕后半段(B-C) 削减比率/%
0.2	0.073 1(A ₃)	0.018 2(C ₃)	75	0.032 5(B ₃)	65	10
0.4	0.073 0(A ₂)	0.016 2(C ₂)	76	0.023 1(B ₂)	66	10
0.6	0.066 6(A ₁)	0.016 0(C ₁)	77	0.032 5(B ₁)	69	8

2.3 不同充气量气泡帷幕的削减效果

司剑锋对室内气泡帷幕形态的研究发现，当充气量增多时，气泡帷幕区域内气泡间隙随之减小，气幕会变得更连续且密集。为进一步量化分析充气量对气泡帷幕防护效果的影响，将充气量转化为气泡帷幕区域内气泡体积占比。图 7 为气泡帷幕区域内不同充气量的示意图， N 表示气泡帷幕区域气泡体积占比，由于设定了气泡帷幕区域的范围和气泡的尺寸大小，当气泡体积占比达到 90% 时，气泡则不能继续完整添加，因此本次计算 N 的最大取值为 90%；同时由于 $N=10%$ 时，其气幕的连续性较差，实际效果缺乏参考作用，所以本次 N 的最小取值为 20%。

为分析以上 8 种不同工况下气泡帷幕对冲击波的削减效果，同图 4 监测方案中取气泡帷幕后的 C_1 、 C_2 、 C_3 作为监测点，并设置无气泡帷幕的工况作为对比。 C_2 监测点在各种工况下的压力时程曲线见图 8。结果表明：随着 N 的增加 C_2 点冲击波峰值压力逐渐减小，且峰值出现时间也随之后移，说明气泡体积占比与冲击波压力削减效果呈正相关性，这与前人的研究结果一致。

对 8 种工况下的 C_1 、 C_2 、 C_3 监测点的峰值压力衰减率进行统计，结果见图 9。8 种工况下 C_1 、 C_2 、 C_3 位置峰值压力的平均削减率分别为 65.3%、69.4%、74.6%、75.4%、77.3%、78.0%、79.2%、81.1%。从整体趋势可知，当气泡体积占比为 20%~40% 时，峰值压力平均削减率上升最为明显；当气泡体积占比达到 40% 后，峰值压力削减率小幅增加并趋于平缓。从各检测点在不同工况下的冲击波峰值压力削减率来看， C_1 点削减率总是大于 C_3 点削减率，即距离水底远的监测点冲击波峰值压力削减率优于距离水底近的监测点，这可能由于模拟计算时气泡帷幕区域的倒锥形摆放使得气幕上半段气泡的连续、密集性优于气幕下半段^[15]。

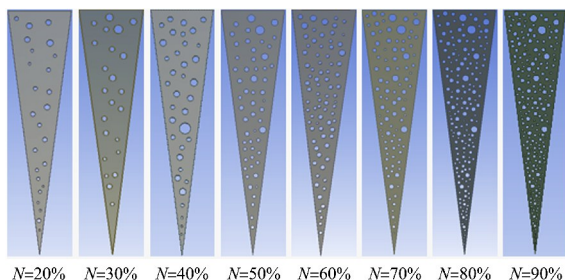


图 7 气泡帷幕不同气泡体积占据效果

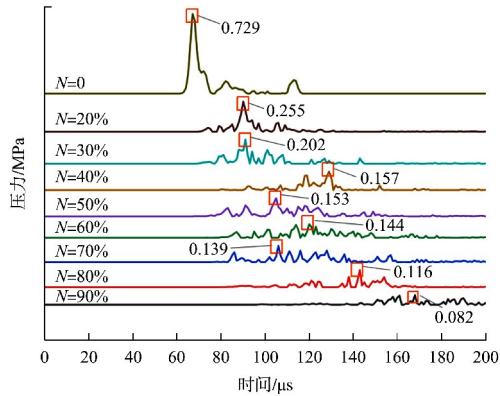


图 8 不同工况下 C₂ 点的应力波时程曲线

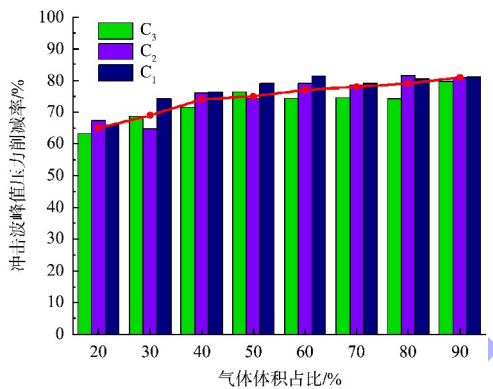


图 9 不同工况下冲击波峰值压力削减率统计

3 气泡帷幕对鱼类的防护效果

炸药在水下爆炸时瞬间产生高温、高压气体, 并形成冲击波在水中传播, 当冲击波压力超过鱼类承受极限时就会对其造成损伤^[16]。李文杰等研究发现鱼类的临界安全波压与鱼体长成正相关性, 鱼类所能承受的最大和最小临界安全波压分别为 30 倍和 3 倍体长。因此, 结合鱼类临界安全波压公式研究水下爆破时气泡帷幕不同布设位置及不同厚度下的鱼类存活最小体长范围具有实际工程意义。

3.1 不同布设位置气泡帷幕的鱼类防护

计算模型见图 10, 上方设置 2 m 高的空气域, 下方设置厚 2 m 的底部礁石, 依据模型尺寸其中埋设炸药 7.0 kg, 气幕宽度为 2 m。为研究气泡帷幕不同布设位置下鱼类存活最小体长范围, 分别建立无气泡帷幕以及气泡帷幕距离爆源水平距离 10、15、20 m 共 4 种工况下的数值模型。图 10 计算模型中气泡帷幕距离爆源水平 20 m。

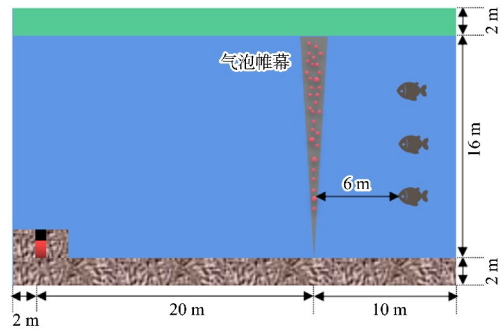


图 10 计算模型

测点设在距离爆源水平 26 m, 距离水底竖直 4、8、12 m 处。通过模拟得到各测点冲击波峰值压力, 并通过典型鱼类最大临界安全波压公式换算成鱼类存活体长, 统计结果见表 5。可知在不设置气泡帷幕时鱼类存活最小体长为 54~62 cm; 气泡帷幕距离爆源 10 m 时, 鱼类存活最小体长为 20~34 cm; 气泡帷幕距离爆源 15 m 时, 鱼类存活最小体长为 14~30 cm; 气泡帷幕距离爆源 20 m 时, 鱼类存活最小体长为 12~24 cm。结果表明: 气泡帷幕距爆源越远即与鱼类距离越近时, 鱼类存活最小体长越小, 气泡帷幕所起的保护作用越强, 这与谢达建对气泡帷幕距离桥墩距离不同的防护研究结论一致^[17]。同时从测点距水底距离上看, 距离水底越近鱼类存活最小体长越大, 因此在实际水下爆破的鱼类防护时, 应加强对底层鱼类的保护。

表 5 不同布设位置气泡帷幕下鱼类存活最小体长范围

测点距水底/m	无气泡帷幕鱼类存活最小体长/cm	鱼类存活最小体长/cm		
		气泡帷幕距离爆源	气泡帷幕距离爆源	气泡帷幕距离爆源
		10 m	15 m	20 m
4	62	34	30	24
8	58	24	18	15
12	54	20	14	12

3.2 不同气泡帷幕厚度的鱼类防护

为探明不同气泡帷幕厚度对鱼类安全防护的效果, 在气泡帷幕距离爆源水平距离 20 m 的数值模型基础上, 设置气泡帷幕厚度 2、3、4 m 等 3 种工况进行研究, 测点布置一致。不同工况下各测点鱼类存活最小体长统计结果见表 6。结果表明: 当气泡帷幕宽度为 4 m 时, 鱼类存活最小体长最小, 即

气泡帷幕的防护效果最好。距离水底 12 m 处的测点效果最佳,由 54 cm 的最小存活体长降低至 6 cm,极大地提高了鱼类存活的体长范围。通过模拟得到气泡帷幕越厚,其防护效果越好,但实际工程中,气泡帷幕在周围水压的作用下会受一定的限制^[18],而这在数值模拟中很难呈现,有待进一步研究。

表 6 不同气泡帷幕厚度下鱼类存活最小体长范围

测点距水底/m	无气泡帷幕鱼体最小存活体长/cm	鱼类存活最小体长/cm		
		气泡帷幕厚 2 m	气泡帷幕宽厚 3 m	气泡帷幕厚 4 m
4	62	24	22	17
8	58	15	14	12
12	54	12	10	6

4 结论

1) 气泡帷幕在对冲击波压力的衰减过程中,气泡帷幕前半段的削减效果大于后半段。

2) 气泡帷幕充气量越大,对爆破冲击波削减效果越明显。充气量为 20%~40% 的工况下,冲击波峰值压力削减比率为 65.3%~74.6%;充气量在 50%~90% 的工况下,冲击波峰值压力削减比率为 75.4%~81.1%。

3) 针对监测点距离水底距离,不同充气量工况下,距离水底远的监测点冲击波峰值压力削减率优于距离水底近的监测点。

4) 气泡帷幕距爆源越远即与鱼类距离越近、气泡帷幕厚度越厚时,气泡帷幕防护效果越强,鱼类存活最小体长越小。

参考文献:

- [1] LANCE R M, BASS C R. Underwater blast injury: a review of standards[J]. Diving and hyperbaric medicine, 2015, 45(3): 190-199.
- [2] QI C, HU Z X, WANG S H, et al. Study on the propagation law of water hammer wave in underwater blasting and the reducing effect of air curtain on water hammer wave[J]. Shock and vibration, 2021: 1-15.
- [3] 彭亚雄, 吴立, 李春军, 等. 水下钻孔爆破水击波特性及气泡帷幕削压效果研究[J]. 爆破, 2019, 36(1): 38-43.
- [4] 张志波, 李春军, 李红勇, 等. 气泡帷幕在水下爆破减震工程中的应用[J]. 爆破, 2003, 20(2): 75-76, 89.
- [5] 刘天云, 龚书堂, 胡伟才, 等. 水下钻孔爆破水击波的传播规律及气泡帷幕对水击波的削减作用[J]. 爆破器材, 2020, 49(2): 16-22.
- [6] 刘欣, 顾文彬, 陈学平. 气泡帷幕对水中冲击波衰减特性的数值模拟研究[J]. 爆破, 2015, 32(3): 79-84.
- [7] 司剑峰, 钟冬望, 李雷斌. 基于气泡形态影响的水下气幕对冲击波衰减效果分析[J]. 爆炸与冲击, 2021, 41(7): 71-79.
- [8] 范怀斌, 陆少锋, 莫崇勋, 等. 多层差异性气泡帷幕对水下爆破冲击波的衰减效应的试验研究[J]. 爆破器材, 2023, 52(2): 48-55.
- [9] 李文杰, 杨宵, 万宇, 等. 水下爆破冲击波作用下典型鱼类临界安全波压模型研究[J]. 爆炸与冲击, 2023, 43(3): 160-168.
- [10] 胡冬冬, 肖翔, 方睿, 等. 基于 ANSYS/LS-DYNA 软件的水下钻孔爆破数值模拟[J]. 水运工程, 2019(1): 19-24, 47.
- [11] 齐世福, 刘新波, 李裕春. 水下钻孔爆破的数值模拟[J]. 工程爆破, 2010, 16(4): 13-17.
- [12] SEN G C, DING D. An investigation into the influence of quasistatic pressure on the mechanism of presplitting rock[J]. Explosives engineering, 1991(2): 18-21.
- [13] MA X J, KONG D R, SHI Y C. Measurement and analysis of shock wave pressure in moving charge and stationary charge explosions[J]. Sensors, 2022, 22(17): 6582.
- [14] BEELEN S, VAN RIJSBERGEN M, BIRVALSKI M, et al. In situ measurements of void fractions and bubble size distributions in bubble curtains [J]. Experiments in fluids, 2023, 64(2): 31.
- [15] ZHU Y J, JIANG C, ZHANG P G, et al. On the interaction between a diffraction shock wave and a cylindrical sulfur hexafluoride bubble [J]. AIP Advances, 2021, 11(4): 045319.
- [16] 赵根, 吴从清, 王文辉. 爆破水中冲击波对鱼类损伤研究[J]. 工程爆破, 2011, 17(4): 103-105, 93.
- [17] 谢达建, 吴立, 洪江, 等. 气泡帷幕对水下爆破冲击波的削弱作用研究[J]. 人民长江, 2018, 49(8): 72-77.
- [18] BEELEN S, VAN RIJSBERGEN M, BIRVALSKI M, et al. In situ measurements of void fractions and bubble size distributions in bubble curtains [J]. Experiments in fluids, 2023, 64(2): 31.

(本文编辑 赵娟)